

doi: 10.11720/wtyht.2020.0003
黄大正,陈守余,赵江南,等.云南个旧老厂矿田东部大比例尺构造地球化学特征及找矿预测[J].物探与化探,2020,44(6):1261-1275.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0003
Huang D Z,Chen S Y,Zhao J N,et al.Large scale tectonic geochemical characteristics and prospecting prediction in eastern Laochang orefield, Gejiu, Yunnan Province[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2020,44(6):1261-1275.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0003

云南个旧老厂矿田东部大比例尺构造地球化学特征及找矿预测

黄大正¹,陈守余^{1,2},赵江南¹,吴帅吉¹,张毓策¹

(1.中国地质大学(武汉)资源学院,湖北 武汉 430074; 2.地质过程与矿产资源国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘 要:老厂矿田是个旧锡铜多金属矿集区的重要组成部分,半个世纪以来,随着资源的消耗,老厂矿田已跨入资源危机行列。为缓解个旧锡铜矿产资源紧缺局面,延长矿山寿命,本文在对研究区开展 1:10 000 构造地球化学测量的基础上,分析总结 12 种元素的地球化学特征,运用相关分析确定出元素相关关系,利用含量—面积(C-A)分形法确定异常下限,圈定异常范围,进而划分找矿远景区。结果表明:12 种元素的离散、分异程度均较大,具有不同程度富集,其中 Pb、Sn、Cu、Bi、As、Cd 等为老厂东部主要成矿元素;Sn、Cu 与 Ag、Sb、Zn、Pb、As、Bi 的相关性较好,与成矿关系密切;圈定的 5 处找矿远景区,经工程验证发现锡铜矿体,说明该地区应用构造地球化学方法可以有效地为找矿工作提供科学依据。

关键词:构造地球化学;C-A 分形;找矿远景区;危机矿山;个旧锡矿

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)06-1261-15

0 引言

个旧矿区是一个以锡为主,兼有铜、铅、锌、钨、银、铋等 20 多种金属的超大型矿集区,其有色金属储量超过 1 000 万 t,Sn 资源储量超过 300 万 t,是我国重要的锡多金属资源储备基地^[1-4]。位于个旧矿区南东方向的老厂矿田,是个旧资源储量最为丰富,开采历史最悠久的主要矿山之一^[5]。随着浅部金属矿产资源开采耗竭,老厂已步入危机矿山行列。为了拓展找矿新空间和新类型,增强后备资源保障度,老厂矿区找矿工作也逐步转向矿区外围和深部隐伏矿体,这也对传统的找矿技术和手段提出了挑战 and 新的要求^[6]。因此,在老厂矿区东部地区加大了地质找矿投入,利用构造地球化学开展矿区深部及外围的找矿工作。

构造地球化学是介于构造地质学和勘查地球化学之间的边缘学科,它主要研究构造作用与元素的分配和迁移、分散和富集等关系,能把成矿作用的空间和元素的运移两大基本地质问题有机地结合起来,为认识矿床成因和成矿规律提供依据,并指导找矿勘探和隐伏矿的定位预测^[7]。近年来,构造地球化学在理论和方法方面均取得了显著研究进展^[8-15],并在隐伏矿体预测领域得到广泛应用^[16-22]。

前人对该地区进行了大量地质勘查和研究,并取得了重要成果^[23-24],但大比例尺构造地球化学找矿预测资料相对匮乏。通过对老厂矿田东部外围开展的 1:10 000 地质填图和构造地球化学勘查工作,发现老厂矿田东部地区构造变形和岩石破碎强烈,地表蚀变矿化普遍,成矿条件较为有利,具有较好的找矿前景。笔者在对矿区成矿地质条件认识的基础

收稿日期: 2019-12-31; 修回日期: 2020-07-26
基金项目: 中国地质调查局项目“云南个旧老厂东深部资源调查”(DD2016005232)
作者简介: 黄大正(1995-),男,硕士研究生在读,矿产普查与勘探专业。Email: huangdz@cug.edu.cn
通讯作者: 陈守余(1956-),男,教授,博士生导师,长期从事矿产综合勘查与定量评价的教学科研工作。Email: sychen@cug.edu.cn

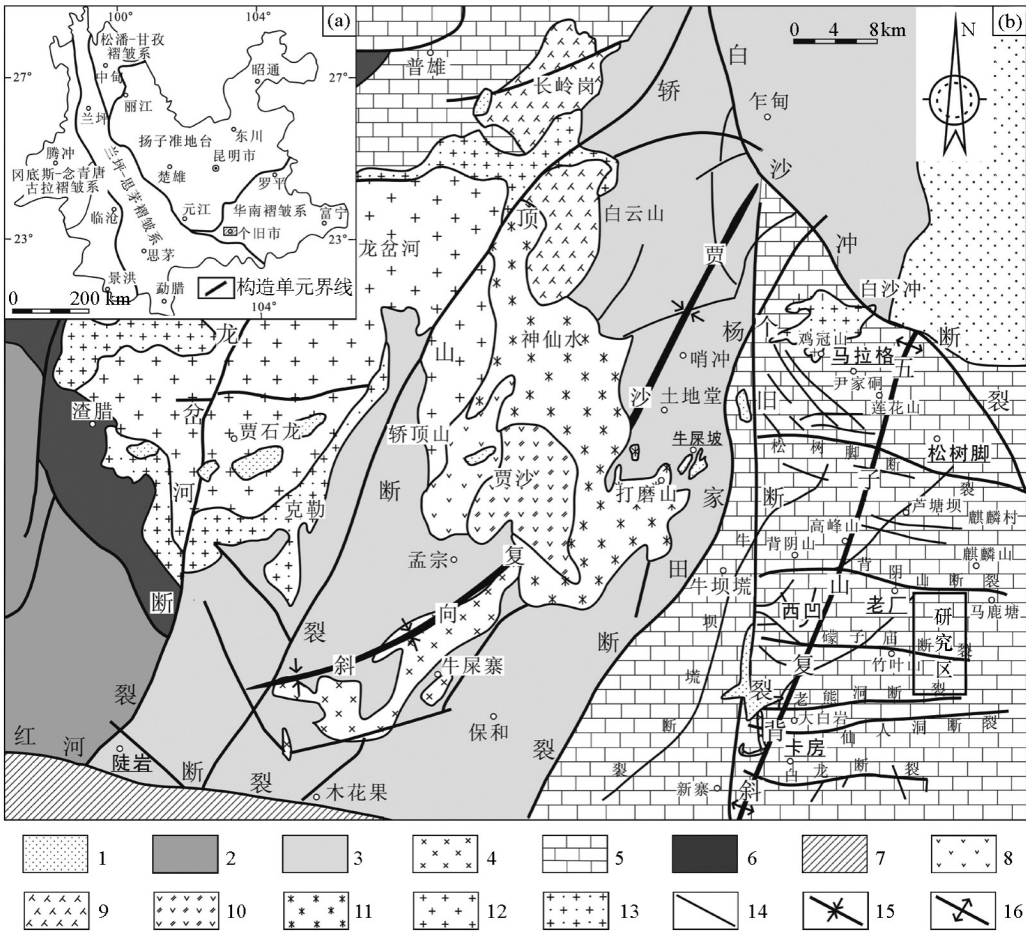
上,利用构造地球化学元素测试分析结果,以多元统计和 C-A 分形为手段,讨论该区域元素含量统计特征、富集规律、组合特征,查明构造地球化学异常特征,综合分析上述特征并结合该区域地质特征圈定找矿靶区,为该地区下一步找矿工作提供依据。

1 地质概况

1.1 个旧矿区地质概况

个旧矿区大地构造位置处于滨太平洋构造域与特提斯构造域交界部位,欧亚板块、太平洋板块和印支板块三者复合的碰撞挤压带(图 1),属于扬子克

拉通、华南褶皱系、三江褶皱系的交汇处^[26]。矿区内出露的地层主要为三叠系碳酸盐岩及砂岩,其中个旧组灰岩、白云岩是最主要的含矿层位。断裂和褶皱构造在矿区内十分发育,SN 向的个旧断裂将矿区分为东区和西区,锡铜多金属矿床多产于个旧东区^[27-28]。东区受 NNE 向五子山复式背斜控制,次级褶皱及 NE、NW、EW 向的断裂构造发育,且多为控岩控矿构造^[29]。EW 向的断裂(松树脚断裂、背阴山断裂、老熊洞断裂、仙人洞断裂、白龙断裂)将个旧东区由北到南依次分割为马拉格、松树脚、高松、老厂、卡房五大矿田^[5,30]。



1—第四系;2—火把冲组板岩、砂岩、砂砾岩;3—法郎组砂岩、页岩夹凝灰岩和玄武质熔岩;4—法郎组玄武质熔岩;5—个旧组碳酸盐岩;6—下三叠统紫红色砂岩夹绿色砂岩、泥灰岩;7—哀牢山变质带;8—辉长岩;9—霞石正岩;10—碱长花岗岩;11—碱性花岗岩;12—斑状黑云母花岗岩;13—等粒黑云母花岗岩;14—断裂;15—向斜;16—背斜

1—Quaternary; 2—slate, sandstone, glutenite of the Huobachong formation; 3—sandstone, shale intercalated with tuff and basaltic lava of the Falang formation; 4—basaltic lava of the Falang formation; 5—carbonate rock of the Gejiu formation; 6—purple-red sandstone with green sandstone and marl of lower Triassic; 7—Ailaoshan metamorphic belt; 8—gabbro; 9—nepheline syenite; 10—alkali-feldspar granite; 11—alkaline granite; 12—porphyritic biotite granite; 13—equigranular biotite granite; 14—fault; 15—syncline; 16—anticline

图 1 云南个旧地区大地构造位置(a)及矿区地质简图(b)(据毛景文等^[25]修改)

Fig.1 Geotectonic location(a) and geological sketch(b) of mining area in Gejiu area, Yunnan province

(according to Mao J W, et al ^[25] modified)

区内岩浆活动具有多期、多阶段特征,自元古宙至新生代的各主要构造活动时期中,均有强度不等、类型不同的活动,其中以印支期、燕山期的基性、酸性岩浆侵入活动最为强烈,但岩浆岩普遍呈隐伏状态产出,出露面积小^[31]。印支期基性岩主要呈层状产出于个旧组下部,分布在卡房、麒麟山、老厂等地^[32]。燕山期大量侵入的辉长岩、碱长花岗岩、碱性花岗岩、斑状黑云母花岗岩、等粒状黑云母花岗岩等,在西区有近 300 km² 出露,在东区多隐伏地下,仅在白沙冲、北炮台、卡房等地小面积出露,该期岩浆作用属于燕山晚期伸展构造背景的产物^[28,33]。

1.2 研究区地质概况

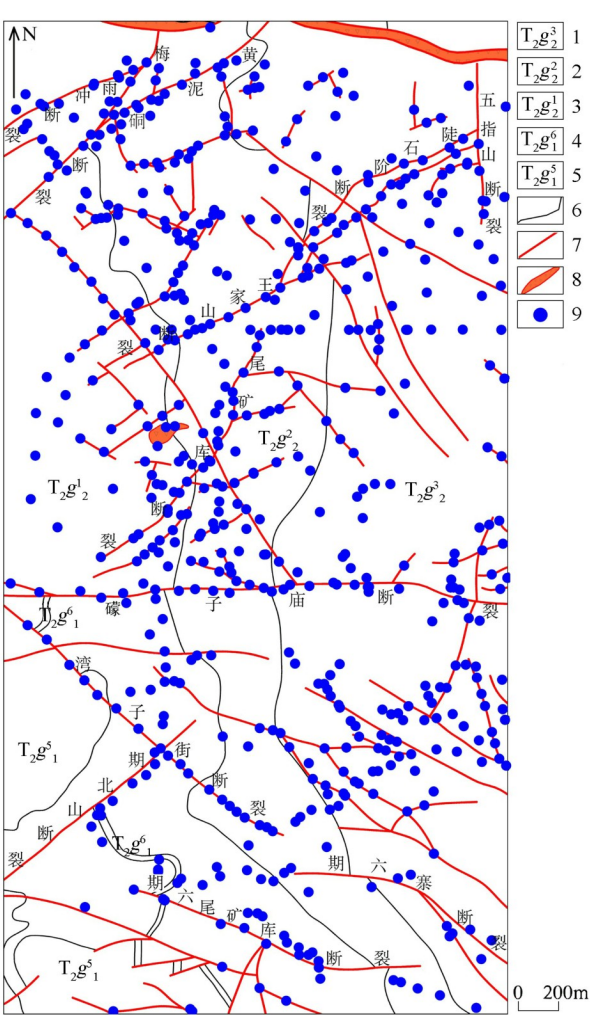
研究区位于老厂矿田东部,地层主要为中三叠统个旧组卡房段和马拉格段碳酸盐岩,岩性主要有厚层状白云岩、灰岩夹灰质白云岩、白云岩与含白云质灰岩互层、灰岩与灰质白云岩互层、泥质灰岩等。

老厂矿田东部断裂构造十分发育,主要包括 NE 向、EW 向两组(图 2)。EW 向断裂是矿田内重要的导矿容矿构造,主要有礞子庙断裂,氧化锡铅矿体、深部接触带矿床和蚀变花岗岩锡铜多金属矿床的产出均与该组断裂有密切联系。NE 向的断裂在本区平面上呈现近等间距产出的特点,主要有陡石阶—尾矿库断裂、梅雨冲断裂、黄泥硐断裂,该组断裂控制了花岗岩岩体的产出形态、隐伏花岗岩体展布,以及接触带和玄武岩型铜矿床的产出,致使矿田内矿床的产出总体呈 NE 向展布^[34]。此外,研究区内还发育有一系列近 NW 向规模不等的断裂,可见不同程度的褐赤铁矿化。印支期基性火山岩及燕山期中细粒黑云母花岗岩为研究区主要岩浆岩,但均不在地表出露,其中燕山期花岗岩属于个旧东区老卡岩体的一部分,是锡铜多金属矿床大多数成矿金属元素的重要物质来源之一^[34-35]。

2 元素数据特征

2.1 样品采集与分析

构造地球化学找矿是应用岩石构造地球化学分析测量来查明研究区构造附近岩体中元素的分布情况,采集的样品主要包括断层泥、矿化或蚀变岩石、破碎带岩石,能最大限度提取矿化信息,总结矿化规律,研究断裂构造与成矿关系,进而为找矿提供地球化学依据^[36-37]。本次 1:10 000 构造地球化学找矿工作在老厂矿田东部约 10 km² 的范围内进行,共采集样品 597 件,采样位置见图 2。所有样品均由自然资源部地质研究所资源检测中心测试分析,每件样



1—一个旧组马拉格段三层,白云岩夹灰质白云岩;2—一个旧组马拉格段二层,白云岩与含白云质灰岩互层;3—一个旧组马拉格段一层,厚层状白云岩;4—一个旧组卡房段六层,灰岩与灰质白云岩互层;5—一个旧组卡房段五层,灰岩夹灰质白云岩;6—地层界线;7—断层;8—断裂破碎带;9—采样点位置

1—the third layer of the Malage section of the Gejiu formation, dolomite with lime dolomite; 2—the second layer of the Malage section of the Gejiu formation, interbedded dolomite and dolomitic limestone; 3—the first layer of the Malage section of the Gejiu formation, thick layered dolostone; 4—the sixth layer of the Kafang section of the Gejiu formation, interbedded limestone and lime dolomite; 5—the fifth layer of the Kafang section of the Gejiu formation, limestone with lime dolomite; 6—stratigraphic boundary; 7—fault; 8—faulted and shattered zone; 9—sampling location

图 2 个旧老厂矿田东部地质简图及采样位置
Fig.2 Geological sketch and sampling location of the eastern part of the Laochang ore field in Gejiu

品分析 Cu、Pb、Zn、Sn、Mn、Ag、As、Sb、Bi、W、Mo 和 Cd 共 12 种元素。各元素的测试分析方法、检出限、报出率、分析准确度与精密度等技术要求严格按照《岩石地球化学测试技术规程》(DZ/T 0248—2014)的要求执行,具体参数见表 1。

表 1 构造地球化学样品分析方法及相关参数

Table 1 Analytic technique and parameter of tectonic geochemical samples

元素	分析方法	检出限/ 10^{-6}	报出率/%
Ag	ES	0.01	100
Sn	ES	0.2	100
Sb	AFS	0.05	100
As	AFS	0.2	97.8
Bi	ICP-MS	0.01	98.8
Cu	ICP-MS	0.2	100
Zn	ICP-MS	2	99.6
Mo	ICP-MS	0.05	100
Cd	ICP-MS	0.2	100
W	ICP-MS	0.1	100
Pb	ICP-MS	0.5	100
Mn	ICP-MS	5	100

2.2 地球化学参数统计

个旧老厂矿田东部测试分析的 12 种元素的含量参数统计特征如表 2 所示,统计参数包括元素含量最大值、最小值、平均值、标准离差、中位数、变异系数和富集系数。

由表 2 可以看出,所有元素平均值均大于其中位数,表明元素存在局部活化富集的可能。根据元素变异系数特征,12 种元素的变异系数均大于 1,说明其在研究区内分布、分配不均匀,离散程度大,存在较强后期叠加富集特征,具有较大的成矿可能性。从富集系数来看,本区 12 种元素的富集系数均大于 1,反映这 12 元素均具有不同程度的富集现象。

计算原始数据变异系数(C_{v1}) 和通过平均值加(减)3倍标准离差剔除后的数据变异系数(C_{v2}),利

表 2 老厂矿田东部构造地球化学元素含量参数统计特征

Table 2 The statistical characteristics of the content parameters of tectonic geochemical elements in the eastern area of Laochang ore field

元素	样品数	最大值	最小值	平均值	标准离差	中位数	变异系数	富集系数	全球碳酸盐岩 ^[38]
Ag	597	44.80	0.01	0.75	2.66	0.14	3.53	>1	0.0n
Sn	597	2000.00	0.74	13.07	90.34	2.00	6.91	>1	0.n
Sb	597	370.27	0.02	8.72	27.03	2.20	3.10	43.60	0.20
Bi	597	315.37	0.02	0.74	12.91	0.07	17.48	>1	—
Mn	597	119900.00	0.03	1676.00	7827.60	312.60	4.67	1.52	1100.00
Cu	597	8816.00	0.50	29.37	362.80	5.60	12.34	7.34	4.00
Zn	597	23020.00	5.00	361.60	1200.62	89.70	3.32	18.08	20.00
Mo	597	200.00	0.22	2.41	12.78	0.67	5.29	6.03	0.40
Cd	597	2217.00	0.03	9.28	95.45	0.51	10.28	232	0.04
W	597	114.60	0.08	2.46	8.23	1.30	3.35	4.10	0.60
Pb	597	40506.75	3.98	467.86	2575.58	73.20	5.50	57.98	9.00
As	597	93305.00	1.00	181.07	3818.84	7.10	21.07	181.07	1.00

注:各元素含量单位为 10^{-6} ;“—”表示空白;变异系数=标准离差/平均值;富集系数=平均值/全球碳酸盐岩元素丰度。

用 C_{v1} 和 C_{v1}/C_{v2} 绘制变异系数解释图(图 3),进一步反映元素富集成矿的可能性。从变异系数解释图中可以看出:Bi、As 在研究区内高值数据多,变化幅度很大,富集成矿可能性较高;Pb、Cu、Sn、Cd 在研究区内高值数据较多,变化幅度中等,有局部富集成矿的可能性。通过上述构造地球化学特征分布,结合区域成矿地质条件,认为 Pb、Sn、Cu、Bi、As、Cd 等为老厂东部地区主要成矿及伴生元素。

2.3 元素的分布型式

利用研究区构造地球化学样品的统计数据制作元素含量—频数对数直方图(图 4)。由图可见,Ag、Cd、Zn、W 呈对数多峰分布,其低含量峰值反映了元素的背景分布,其高含量峰值反映了元素的异常分布。Ag、Bi、Cu、Mn、Pb、Sn、Zn 均出现明显的右偏,而且分布范围(百万数据),离散度较大,表明这些元素参与了

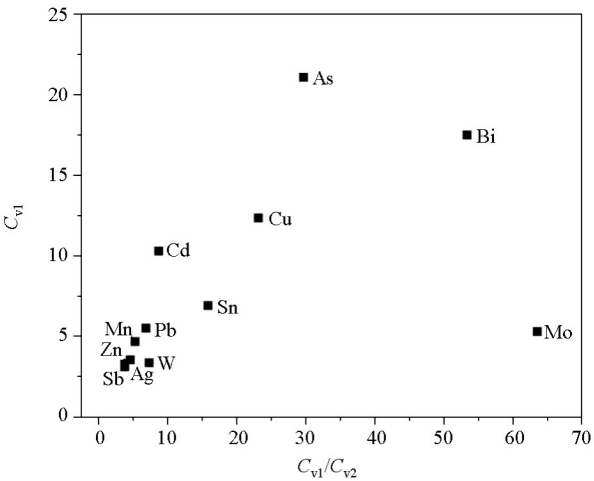


图 3 老厂矿田东部构造地球化学元素变异系数解释
Fig.3 The coefficient of variation of tectonic geochemical elements in the eastern area of Laochang ore field

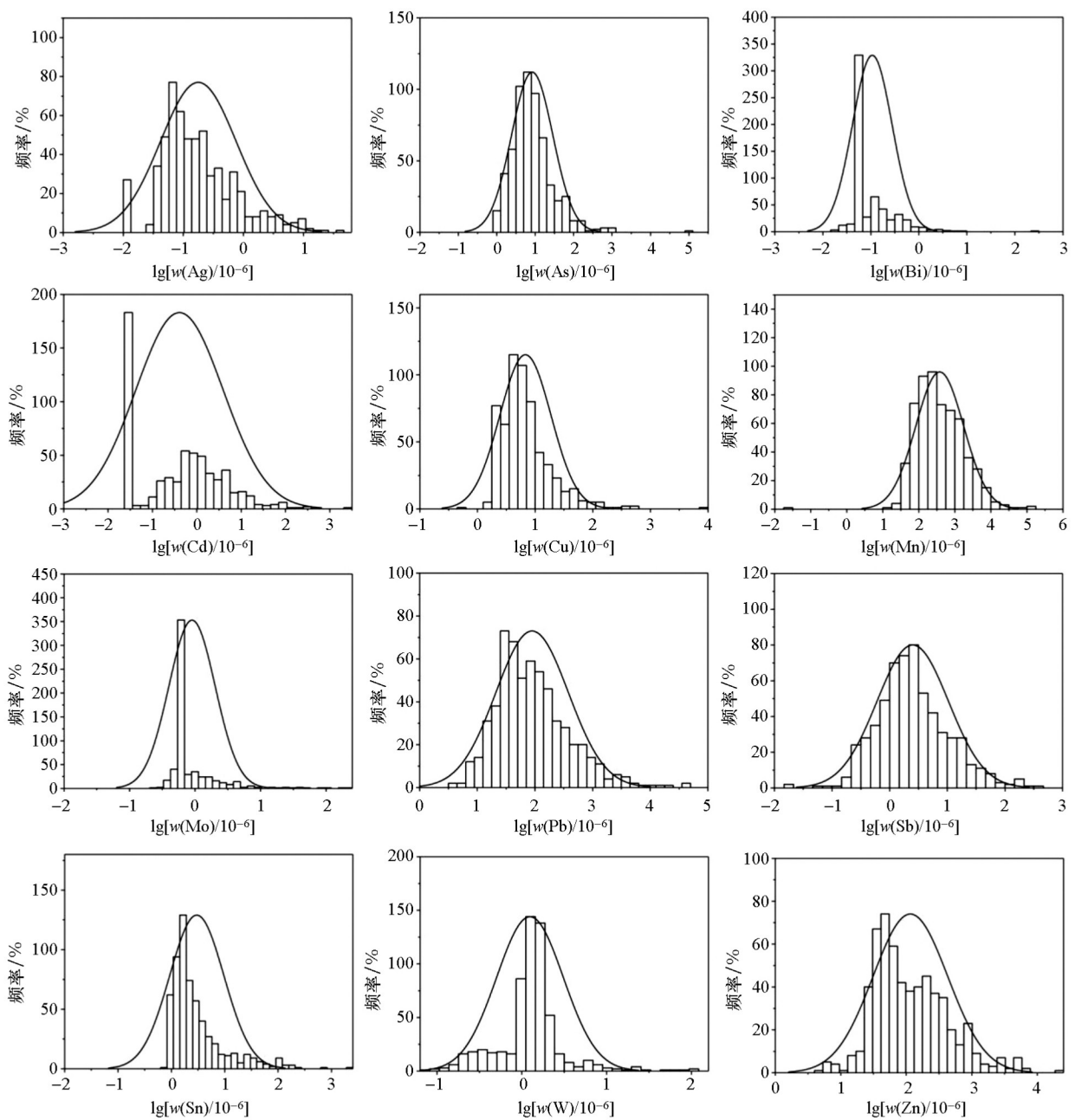


图 4 老厂矿田东部构造地球化学元素对数含量分布直方图

Fig.4 Histogram of the logarithmic content distribution of tectonic geochemical elements in the eastern area of Laochang ore field

次生富集成晕作用及过程。Pb、Sb、As、Mn 含量的分布型式近似服从对数正态分布,呈单峰分布,其中 Pb、Mn 呈单峰右偏分布,反映这些元素虽参与了成矿作用,但在成矿过程中富集趋势不强烈。

2.4 元素相关性分析

利用 SPSS 软件对进行对数变换及标准化后的 12 种元素数据进行相关性分析(表 3),结果显示 Sn 与 Ag、Sb、Cu、Zn、Pb、As、Cu 与 Sn、Bi、Pb、As 的相

关系数大于 0.6,表明 Sn、Cu 与这几种元素的相关性较好,相关性较好的元素可能在来源和成因上具有一定的内在联系。在分析的 12 种元素中,Pb 与 Zn 的关系最为密切,其次是 Mn 与 Ag、Mn 与 Pb、Mn 与 Zn,这与本区成矿元素组合关系基本一致,在矿体中 Ag 与 Mn、Pb 和 Zn 总是密切共生,同时,这 4 个元素也是远离接触带的层间氧化矿的特征元素组合。

表 3 老厂矿田东部构造地球化学元素相关分析

Table 3 Correlation analysis of tectonic geochemical elements in the eastern part of Laochang ore field												
元素	Ag	Sn	Sb	Bi	Mn	Cu	Zn	Mo	Cd	W	Pb	As
Ag	1.00											
Sn	0.61	1.00										
Sb	0.64	0.61	1.00									
Bi	0.35	0.49	0.40	1.00								
Mn	0.76	0.57	0.66	0.26	1.00							
Cu	0.53	0.64	0.57	0.60	0.44	1.00						
Zn	0.71	0.61	0.74	0.27	0.75	0.54	1.00					
Mo	0.44	0.53	0.41	0.48	0.30	0.56	0.31	1.00				
Cd	0.64	0.48	0.54	0.34	0.63	0.50	0.70	0.30	1.00			
W	0.52	0.57	0.67	0.39	0.49	0.46	0.47	0.50	0.29	1.00		
Pb	0.74	0.66	0.74	0.37	0.76	0.60	0.83	0.44	0.67	0.62	1.00	
As	0.64	0.69	0.75	0.63	0.57	0.70	0.68	0.53	0.58	0.57	0.70	1.00

3 元素异常分布特征

在锡铜多金属矿床中, Sn、Cu、Pb、Zn、Ag、As、Sb、Bi 是较好的指示元素^[39]。针对区内多种元素的构造地球化学测量数据, 根据相关性分析及野外勘查实践, 并结合多类型 Sn-Cu 多金属矿床元素组合的一般规律, 选取对于锡铜矿化均有较好指示作用的 Sn、Cu、Pb、Zn、Ag、As、Sb、Bi, 确定元素地球化学异常下限, 分析元素异常分布特征。

3.1 异常下限确定

地球化学异常下限的确定是勘查地球化学中最基本的问题, 异常下限值过高容易遗漏隐伏矿床形成的致矿异常, 而异常下限过低则容易圈出大面积

致矿异常, 不能有效地识别和提取异常^[40], 因此, 合适的异常下限对于指导找矿具有重要意义。目前, 常用的地球化学异常下限确定方法有传统统计法、稳健估计法、85% 累积频率法、趋势面法、衬值滤波法、多重分形等。

3.1.1 传统统计法

传统的计算异常下限的方法是建立在数据符合正态或者对数正态分布基础上的, 所以首先要对区域内取得的化探数据进行正态分布检验。图 4、表 4 显示, 云南个旧老厂东地区构造地球化学 Sn、Cu、Pb、Zn、Ag、As、Sb、Bi 元素的对数数据整体上并不完全服从正态分布, 且迭代处理后的数据也不完全服从正态分布。因此, 传统统计法不适用于老厂东地区构造地球化学异常下限的确定。

表 4 老厂矿田东部构造地球化学元素数据正态检验特征值

Table 4 Normal test characteristic values of tectonic geochemical elements in the eastern part of Laochang ore field						
元素	原始数据			剔除特高低值		
	样品数	峰度	偏度	样品数	峰度	偏度
Ag	597	0.76	0.83	590	0.40	0.70
As	597	6.39	1.57	578	0.11	0.53
Bi	597	10.32	2.39	556	1.19	1.23
Cu	597	5.72	1.68	560	0.12	0.67
Pb	597	1.22	0.88	584	-0.03	0.53
Sb	597	0.64	0.42	580	-0.14	0.31
Sn	597	4.00	1.89	504	0.56	1.03
Zn	597	0.55	0.71	594	0.20	0.61

注: 元素含量单位为 10⁻⁶

3.1.2 C-A 分形法

传统的方法忽略了地球化学场空间聚散性和其所蕴藏的成矿过程奇异性, 导致圈定的地球化学异常往往缺乏地质意义^[41]。Cheng 等^[42]从分形理论中认识到地球化学的背景值和异常值具有各自独立的幂律关系, 数据有不同的自相似性, 由此导致了一

种多重分形分布, 通过利用分形与多重分形技术进行元素地球化学分析, 从此开创了分形领域里处理化探数据的先河, 该方法也成为了识别和确定地球化学异常、研究地球化学规律强有力的工具^[43-48]。笔者利用 C-A 分形法确定研究区元素地球化学异常下限。

设分形模型:

$$A(r) = C \cdot r^{-D}, r > 0, \tag{1}$$

式中: r 为元素含量值; $A(r)$ 为元素含量大于(等于) r 的面积值; C 为比例常数; D 为分维数($D \geq 0$, 可为非整数)。

将式(1)两边取对数,得到方程:

$$\lg A(r) = \lg(C) - D \lg(r). \tag{2}$$

利用最小二乘法进行直线段拟合,并求得相应的分维数 D ,分维数能够反映出元素含量在空间上的形态分布,具体表现是含量分布的丛集与不均匀程度;将拟合直线的交点作为分界点,结合区域地质背景和成矿规律,确定合适的临界值作为元素的异常下限值用来划分背景和异常;在含量—面积(C - A) 双对数散点图中,如果元素符合简单分形分布,则只需用一条线段拟合;如果多条线段拟合,则

称之为多标度分形,说明元素含量的分布满足多重分形特征,研究元素可能有多个不同的源(标度特征)或者来源于多个不同的地质过程^[42]。

应用多重分形的 C - A 方法对 Ag 、 As 、 Bi 、 Cu 、 Pb 、 Sb 、 Sn 、 Zn 8 种元素进行分形统计分析,得到了元素含量—面积的双对数散点图(图 5)。用最小二乘法拟合得到的线段均通过显著性检验, D_1 、 D_2 、 $\cdots$ 为不同拟合线段斜率的绝对值,代表对应无标度区的分维数值, C_1 、 C_2 、 $\cdots$ 为拟合线段之间的分界点。

通过散点图(图 5)可以得出:8 种元素的双对数散点图在空间分布上具有相似的特征,可以分为 3 个或 3 个以上的分线段(无标度区),每一个标度区对应着一个分维数,各段之间有较为明显的分界点,元素含量在一定浓度区间段内服从分形分布。各元素的 C - A 分形曲线十分相似,表明其成矿富集

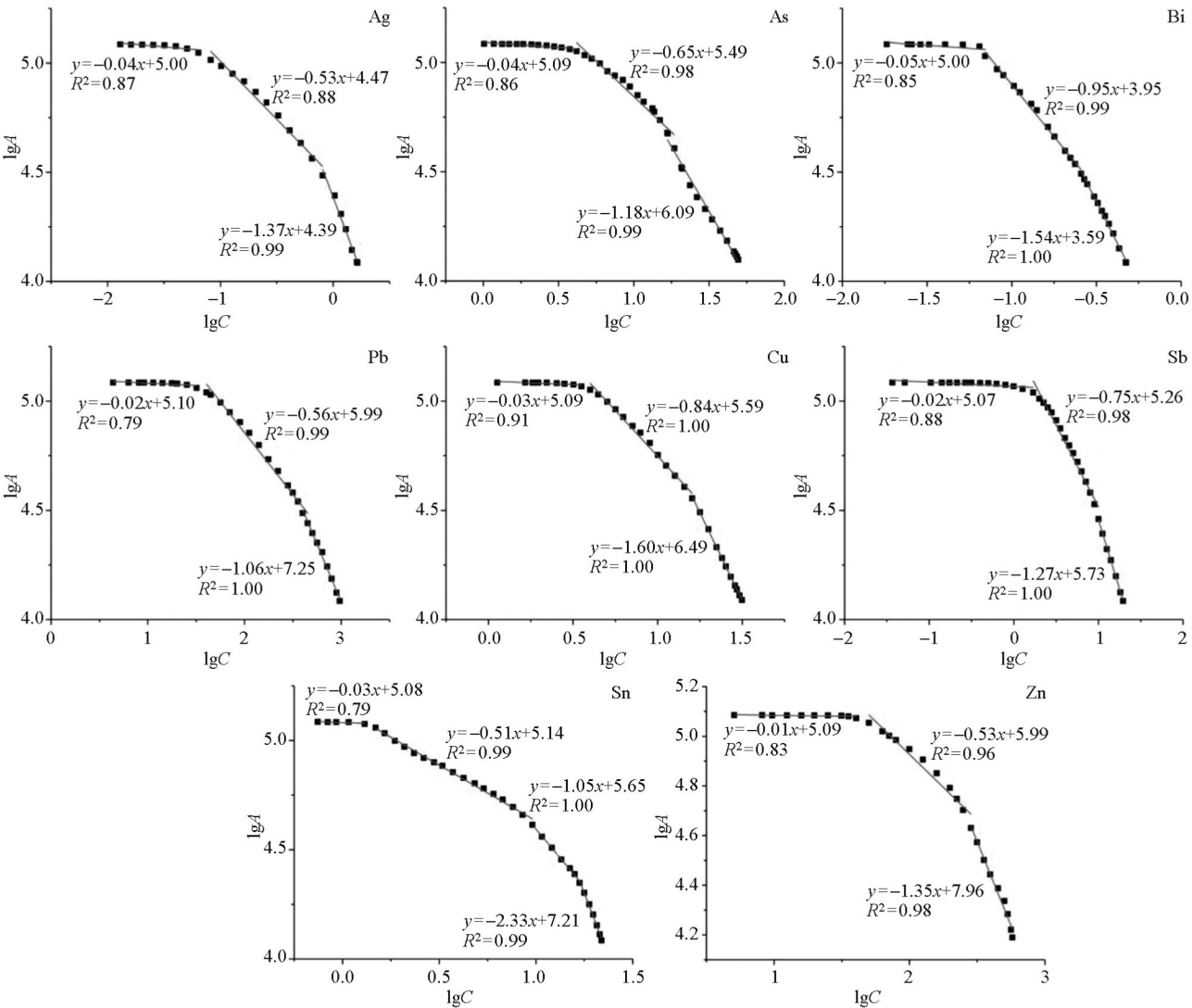


图 5 不同元素 C-A 双对数散点及分段拟合

Fig.5 C-A double logarithmic scatter of different elements and piecewise fitting graph

万方数据

作用可能有相同的成因,有利于找矿。在低值区拟合的直线斜率均接近 0,较为平坦,为背景区。第二直线段为元素的主要含量区间,拟合优度 R^2 都接近于 1,体现出明显的相关性和良好的拟合程度,一般为区域地质作用形成的区域异常区。第三段的斜率相对较大,均大于第二段的斜率,反映含量高值的相对下降频率加大且分布面积较小,通常反映局部矿化作用形成的局部地球化学异常,有可能形成小规模矿点。研究区 8 种元素中仅 Sn 用 4 段线段拟合,说明 Sn 元素含量的空间分布相对更复杂,其高含量部分在局部地段很富集,对成矿更有利。

根据以上 8 种元素的 C-A 双对数散点图的拟合方程,统计出多段异常的分形维数和对应分界点,如表 5 所示。在同一空间范围内, D 值越小,表明元

素含量在空间上局部的丛集程度越大,空间分布越不均匀,而对成矿作用来说,元素的空间分布越不均,局部丛集程度越高,对成矿越有利。统计表显示,8 种元素分维数 D_2 均小于 1,分维数 D_3 均小于 2,这些元素在异常区中丛集程度较高,高含量点较多,富集成矿的可能性较大。

拟合直线的第一段和第二段的交点对应的含量可认为是区域异常的下限(C_1),第二段和第三段的分界点对应的含量可认为是局部异常的下限(C_2),据此可以划分地球化学背景、区域异常和局部异常。因此,可以将第二段拟合直线与第三段拟合直线的分界值(C_2)作为研究区各元素的异常下限,然后采取异常下限的 1、2、4 倍来划分一、二、三级异常(表 6)。

表 5 构造地球化学元素 C-A 分形统计特征
Table 5 C-A fractal statistical characteristics of elements

元素	特征值						
	D_1	D_2	D_3	D_4	C_1	C_2	C_3
Ag	0.04	0.53	1.37	—	0.08	0.78	—
As	0.04	0.65	1.18	—	4.07	17.38	—
Bi	0.05	0.95	1.54	—	0.07	0.23	—
Cu	0.03	0.84	1.60	—	3.80	17.78	—
Pb	0.02	0.56	1.06	—	36.31	398.11	—
Sb	0.02	0.15	1.27	—	1.55	9.55	—
Sn	0.03	0.51	1.05	2.33	1.38	9.12	18.62
Zn	0.01	0.53	1.35	—	46.77	281.84	—

注: D 表示各分线段元素的分维数; C 表示分界点转换为真数的元素含量值;元素含量单位为 10^{-6} ;“—”表示空白。

表 6 个旧老厂矿田东部元素异常下限统计
Table 6 Statistics of abnormal lower bound of tectonic geochemical elements

元素	Ag	As	Bi	Cu	Pb	Sb	Sn	Zn
一级异常	0.78	17.38	0.23	17.78	398.11	9.55	9.12	281.84
二级异常	1.55	34.76	0.46	35.57	796.21	19.10	18.24	563.68
三级异常	3.10	69.51	0.92	71.13	1592.43	38.20	36.48	1127.35

注:元素含量单位为 10^{-6} 。

3.2 单元素异常特征

利用 C-A 分形法求得异常下限,通过 Surfer、MapGIS 软件绘制 Ag、As、Bi、Cu、Pb、Sb、Sn、Zn 单元元素异常图(图 6)。由图显示,8 种元素异常主要分布于研究区的北西部、东部及中部,总体呈 NW 向的串珠状,局部呈岛状,均具有明显的异常浓度分带,且异常形态、规模、出露位置大致相同,具有较好的套合性与相关性,与相关性分析的结果相一致。各元素异常浓集中心明显并具多个浓集中心,异常浓集中心多位于构造发育部位,有利于成矿。其中,As、Bi、Cu、Pb 异常在东部偏南相同区域出现明显三级异常,且三级异常面积相似,说明此处异常规模、

强度较高,为有利成矿部位。

3.3 综合异常特征

在单元素异常的基础上,根据研究区元素地球化学背景、元素组合特征、元素相关性,并结合区内成矿地质环境,共圈定 7 处综合异常(图 7)。从综合异常圈定结果分析来看,综合异常整体上呈现 NW 向带状展布,与研究区内断裂构造关系密切,特别是在构造交叉部位异常较强,这表明断裂是成矿热液的主要运移通道,断裂的交叉部位以及其与次级断裂的交叉部位又是成矿热液聚集的场所,也是隐伏矿床的最佳找矿部位。各综合异常特征如表 7 所述。

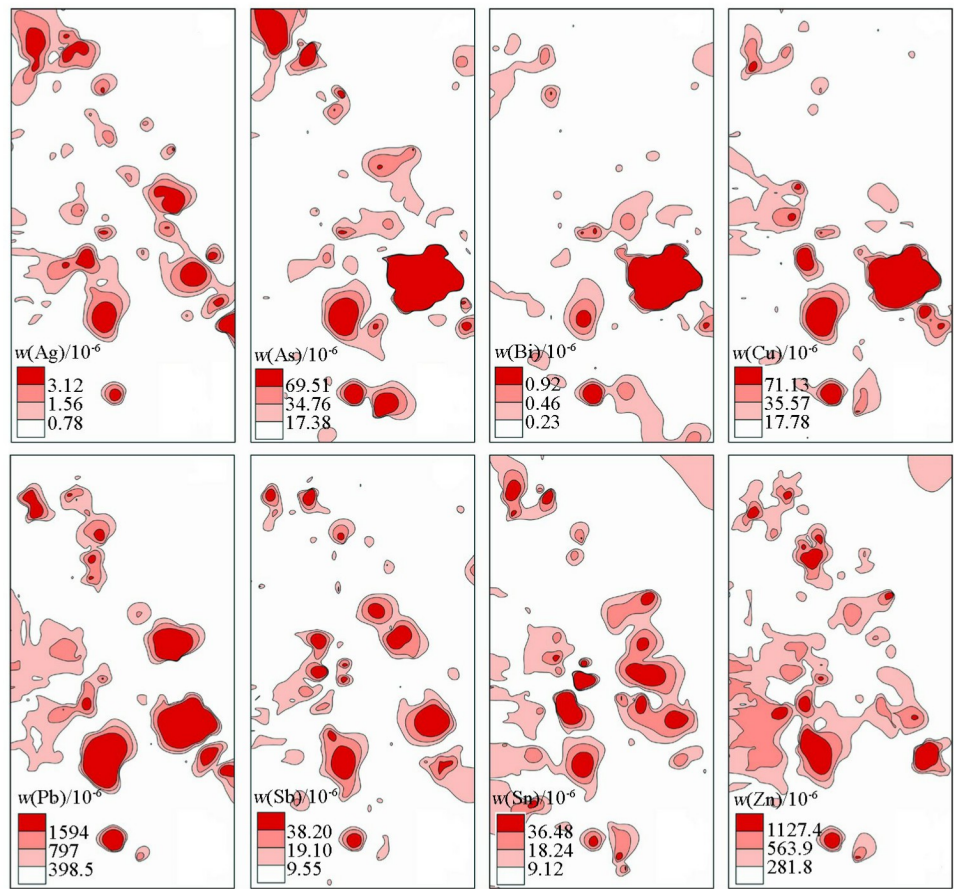


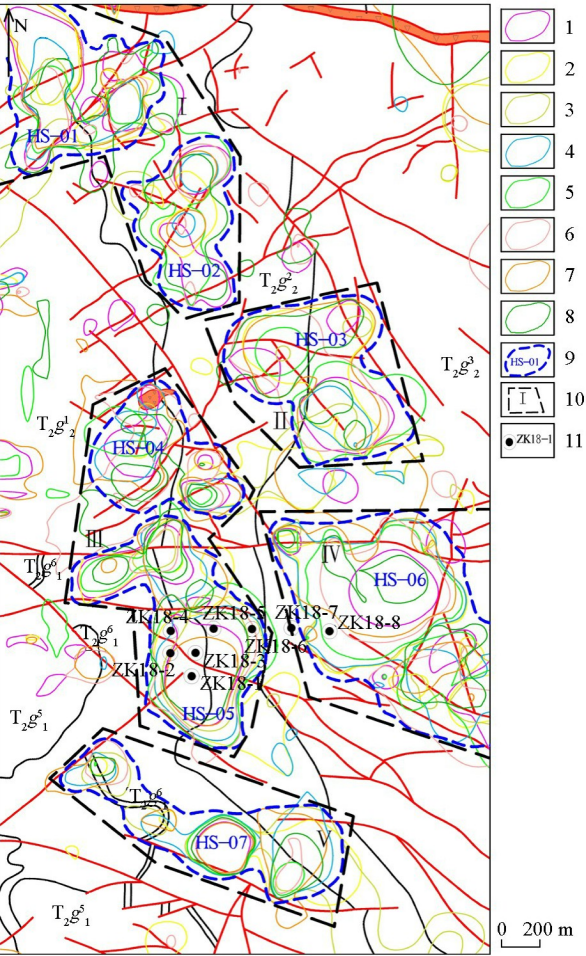
图 6 个旧老厂矿田东部 1:10 000 构造地球化学测量单元元素异常

Fig.6 Single element anomaly diagram of 1:10 000 tectonic geochemical survey in the eastern part of Laochang ore field

表 7 综合异常特征统计

Table 7 Comprehensive abnormal feature statistics

综合异常编号	面积/km ²	元素组合	异常特征
HS-01	0.52	Sb-Bi-Pb-Cu-Zn-As-Sn-Ag	出露地层为个旧组马拉格段二层(T ₂ g ₂ ²)白云岩与含白云质灰岩互层、个旧组马拉格段一层(T ₂ g ₂ ¹)厚层状白云岩,异常区内异常元素套合好,各元素三级浓度分带明显,异常区内断裂较为发育
HS-02	0.34	Sb-Cu-Sn-Pb-As-Zn-Ag	出露地层为个旧组马拉格段二层(T ₂ g ₂ ²)白云岩与含白云质灰岩互层,异常区内断裂较为发育,Sb、Cu、Sn 聚于核部,Pb、Zn、Ag、As 异常分布于外围,Ag、As、Pb、Sb、Zn 三级浓度分带明显,但异常面积较小
HS-03	0.34	Zn-Cu-As-Sn-Sb-Ag-Pb-Bi	出露地层为个旧组马拉格段三层(T ₂ g ₂ ³)白云岩夹灰质白云岩、个旧组马拉格段二层(T ₂ g ₂ ²)白云岩与含白云质灰岩互层,异常区内断裂构造发育,Ag、Pb、Sb、Zn 三级浓度分带明显
HS-04	0.34	Pb-Zn-Sb-Ag-Sn-Cu-Bi-As	出露地层为个旧组马拉格段二层(T ₂ g ₂ ²)白云岩与含白云质灰岩互层、个旧组马拉格段一层(T ₂ g ₂ ¹)厚层状白云岩,异常区内断裂极为发育,元素套合较好,Sn、Cu、Sb 出现三级浓度分带,但面积较小
HS-05	0.61	Zn-Sn-Ag-Bi- Sb-Cu-As-Pb	出露地层为个旧组马拉格段二层(T ₂ g ₂ ²)白云岩与含白云质灰岩互层、个旧组马拉格段一层(T ₂ g ₂ ¹)厚层状白云岩,元素套合较好,具有 2 个浓集中心,元素三级浓度分带明显
HS-06	0.94	Zn-Ag-Sn-Sb-Pb-Cu-Bi-As	岩性较为简单,出露地层为个旧组马拉格段三层(T ₂ g ₂ ³)白云岩夹灰质白云岩,具有 1 个明显的浓集中心,异常套合较好,异常元素浓度高,异常面积较大,Ag、Pb、Sb、Sn 三级浓度分带明显
HS-07	0.47	Sn-Ag-Sb-Zn-Pb-As-Bi-Cu	出露地层为个旧组马拉格段二层(T ₂ g ₂ ²)白云岩与含白云质灰岩互层、个旧组马拉格段一层(T ₂ g ₂ ¹)厚层状白云岩、个旧组卡房段六层(T ₂ g ₁ ⁶)石灰岩与灰质白云岩互层,具有 3 个明显的浓集中心,异常套合较好,异常元素浓度较大,但异常面积较小



1—Ag 元素异常;2—As 元素异常;3—Bi 元素异常;4—Cu 元素异常;5—Pb 元素异常;6—Sb 元素异常;7—Sn 元素异常;8—Zn 元素异常;9—综合异常区及编号;10—找矿远景区及编号;11—钻孔及编号;其他图例同图 2

1—Ag element anomaly; 2—As element anomaly; 3—Bi element anomaly; 4—Cu element anomaly; 5—Pb element anomaly; 6—Sb element anomaly; 7—Sn element anomaly; 8—Zn element anomaly; 9—comprehensive anomaly area and number; 10—prospecting area and number; 11—drilling hole and number; other legends are the same as Fig.2

图 7 个旧老厂矿田东部综合异常分布及找矿远景区划分

Fig.7 Comprehensive anomaly distribution and prospecting prospect zoning in the eastern part of Laochang ore field

4 异常查证

根据研究区元素综合异常分布特征及成矿地质背景,结合野外地质调查工作,重点针对 HS-05、HS-06 综合异常区域开展了相应的异常检查工作。本次主要通过野外地质调查及钻探工程初步查明引起元素综合异常的地质原因。

HS-05 综合异常位于研究区中部偏南西方向,呈不规则状 NW 向展布,8 种元素均在此处富集,且

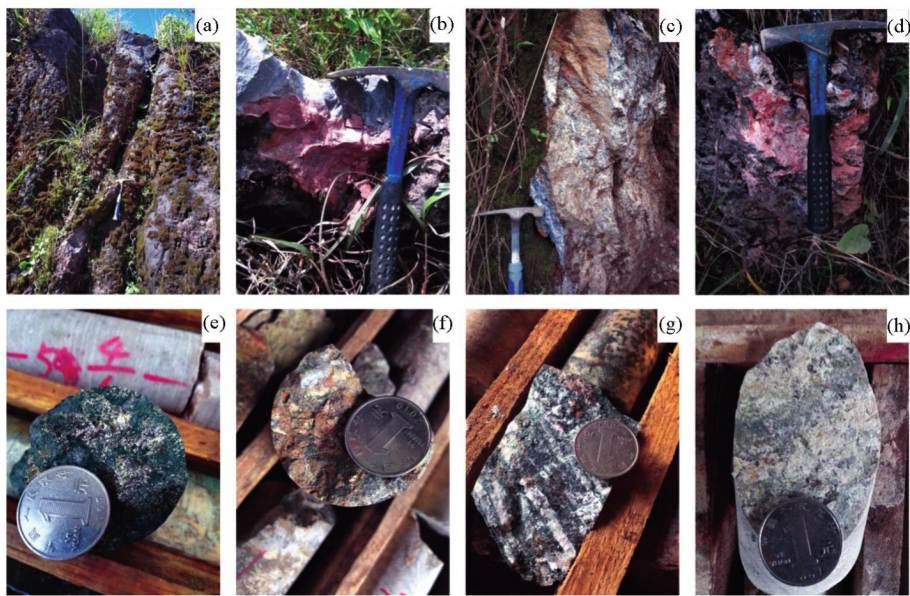
具有三级浓度分带,异常浓集中心明显。踏勘发现 HS-05 综合异常区出露的岩石为白云岩与含白云质灰岩互层、厚层状白云岩,由北到南发育有 3 条大型断裂构造,分别为 EW 向的礞子庙断裂、大冲断裂及近 NW 向的期六寨断裂。异常区内构造裂隙极发育,断裂部位岩石较为碎裂,可见碎裂岩及构造角砾岩(图 8a),褐铁矿化明显(图 8b),且裂隙多为方解石脉充填,脉体呈多期次的网脉状、细脉状(图 8c)。HS-06 综合异常位于研究区的东偏南方向,呈不规则 NW 向展布,各元素具有三级浓度分带,Cu、Bi、As、Pb 异常套合较好,且 Cu、Bi、As 异常面积较大,异常浓集中心明显。踏勘发现 HS-06 综合异常区出露的岩石较为单一,为白云岩夹灰质白云岩。区内断裂构造发育,断裂部位可见构造角砾岩、碎裂岩、褐红色铁质胶结及网脉状方解石脉体,局部可见氧化矿和半风化的硫化矿(图 8d)。

利用钻探对异常区进行进一步的查证,沿 130 勘探线组织实施钻孔,圈定 1 个铜矿体,2 个锡矿体和 1 个铜矿化体(图 8e、f)。铜矿体呈透镜状沿花岗岩展布,由北向南逐渐变厚,单工程 Cu 平均品位 0.4%~1.76%,且伴生 Sn,Sn 平均品位 0.122%,赋矿围岩主要为透辉石矽卡岩(图 8g)。锡矿体产出于铜矿体下部,呈脉状,单工程 Sn 平均品位 2.331%,赋矿围岩主要为透辉石矽卡岩。铜矿化体单工程 Cu 平均品位为 0.17%,赋矿围岩为变玄武岩,其中有强磁黄铁矿化、碳酸盐化和不同程度的绿泥石化(图 8h)。

以横穿 HS-05、HS-06 的 130 勘探线绘制地质—地球化学异常剖面(图 9),剖析各元素变化趋势特征,判断各元素与断裂构造及矿体的关系。由图可知,剖面上元素含量变化较大,各元素之间呈明显的正相关关系。整体上各元素含量峰值与断裂构造位置对应较好,也进一步证明研究区内断裂是良好的导矿构造。图上切穿燕山期花岗岩、变玄武岩的断裂构造处,各元素均出现峰值,这进一步证明老厂矿田成矿与燕山期花岗岩、变玄武岩密切相关。各元素在隐伏矿(化)体上方含量均出现不同程度的增高,显示与矿体位置呈明显的对应关系,这表明该研究区构造地球化学勘查可以有效识别矿体的位置,能为寻找隐伏矿体提供有利依据。

5 找矿远景区划分

在对研究区综合地球化学异常圈定和异常查证的基础上,结合研究区内成矿地质特征、构造环境,



a—构造破碎带角砾岩;b—褐铁矿化;c—网脉状、细脉状方解石脉;d—褐铁矿化碎裂岩;e—含矿矽卡岩;f—矽卡岩硫化矿石;g—透辉石矽卡岩;h—绿泥石化大理岩
a—tectonic fracture zone breccia; b—limonitization; c—net-shaped and thin-shaped calcite veins; d—limonitization cataclastic rock; e—ore-bearing skarn; f—skarn sulfide ore; g—diopsideskarn; h—chlorite marble

图 8 个旧老厂矿田东部野外及岩心照片

Fig.8 Photographs field and core in the eastern part of Laochang ore field

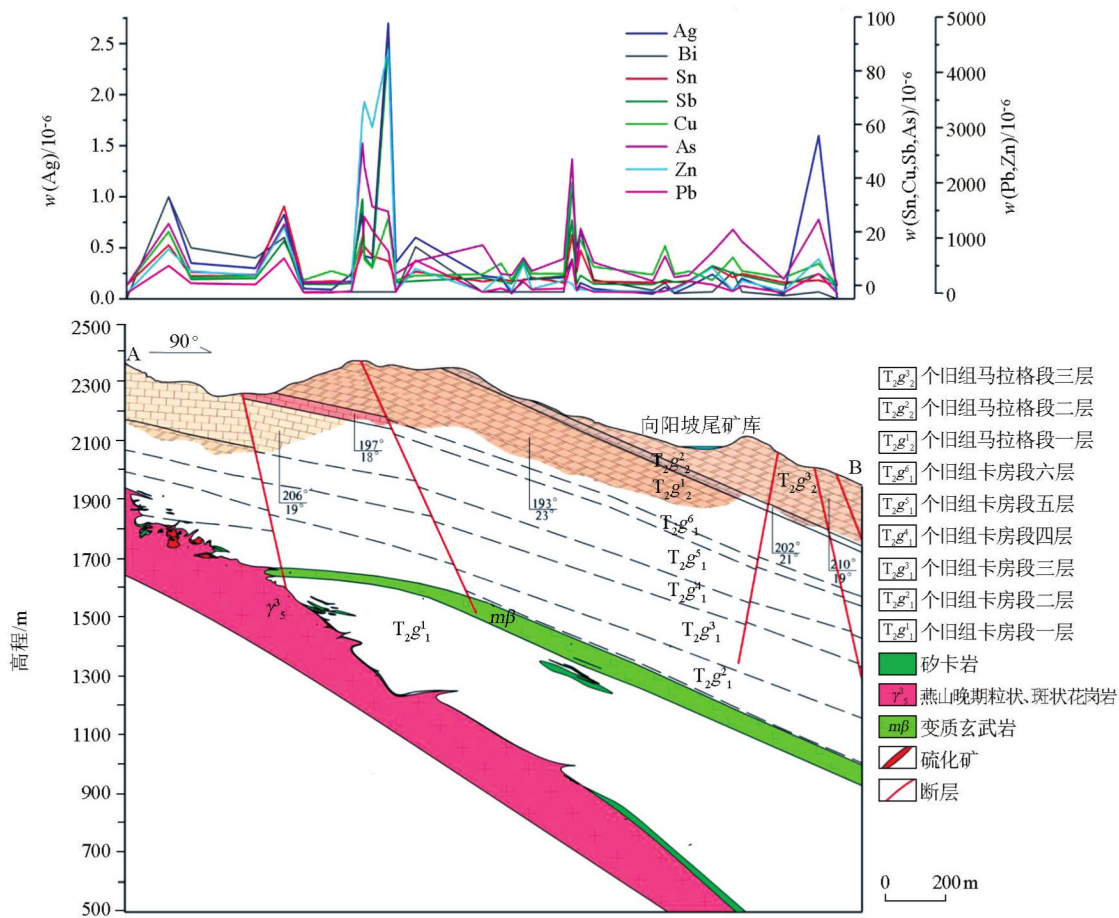


图 9 个旧老厂矿田东部地质—地球化学信息剖面

Fig.9 Geological-geochemical information section in the eastern part of Laochang ore field

圈定出具有一定找矿潜力的远景区 5 处,将其编号为 I、II、III、IV、V,如图 7 所示。

I 号找矿远景区:位于研究区西北角,区内出露地层为个旧组马拉格段二层($T_2g_2^2$)白云岩与含白云质灰岩互层、个旧组马拉格段一层($T_2g_1^1$)厚层状白云岩。区内发育有 NE 向的大型断裂构造和 NW 向的次级断裂构造,断裂构造为含矿热液运移提供了良好的运移通道和有利的储存空间,断裂交汇部位元素异常强烈,地表未见岩浆岩出露。I 号找矿远景区包括 HS-01 和 HS-02 两个综合异常区,其中,HS-01 异常区呈团块状展布,Ag、As、Cu、Pb、Sb、Sn、Zn 异常浓集中心明显,且具有良好的三级浓度分带,且 Ag、As、Sn 异常值较高。通过野外地质路线调查发现,该区在断裂部位可见碎裂岩、构造角砾岩,且沿裂隙发育有方解石脉和网脉状的褐铁矿化。因此,该区是寻找锡铜多金属矿体的有利地段,下一步通过钻探工程开展深部勘查工作,查明深部矿体延伸和赋存情况。

II 号找矿远景区:位于研究区中部偏北东向,区内出露地层为个旧组马拉格段三层($T_2g_2^3$)白云岩夹灰质白云岩、个旧组马拉格段二层($T_2g_2^2$)白云岩与含白云质灰岩互层,区内主要发育有 NW 向断裂构造,断裂交汇部位元素异常强烈,地表未见岩浆岩出露。II 号找矿远景区仅包括 HS-03 元素综合异常区,HS-03 元素综合异常区呈不规则状展布,Ag、Pb、Sb、Sn 元素具有良好的三级浓度分带,且异常元素浓度高,但 Bi、Cu 元素异常较弱。通过野外地质路线调查发现,该区在断裂部位可见碎裂岩、断层角砾岩,受构造作用影响裂隙较为发育,其内胶结铁泥质。

III 号找矿远景区:位于研究区中部偏南西方向,区内出露地层为个旧组马拉格段二层($T_2g_2^2$)白云岩与含白云质灰岩互层、个旧组马拉格段一层($T_2g_1^1$)厚层状白云岩。III 号找矿远景区包括 HS-04 和 HS-05 两个综合异常区。HS-04 元素综合异常区呈不规则状展布,区内发育有多组 NE 向的断裂构造,元素套合较好,具有 2 个浓集中心,仅 Cu、Sn、Sb 出现三级浓度分带。HS-05 元素综合异常区内发育有礞子庙断裂,元素三级浓度分带明显,异常套合好且异常浓度高、面积大。通过野外地质路线调查发现,异常区内构造裂隙极发育,断裂部位岩石较为碎裂,可见碎裂岩及构造角砾岩,褐铁矿化明显,且裂隙多为网脉状方解石脉充填。利用钻探查证发现锡铜矿体,有强磁黄铁矿化、碳酸盐化和不同程度的绿泥石化。该区是寻找锡铜多金属矿体的有利地段,应进一步

深入开展工作。

IV 号找矿远景区:位于研究区东部,出露地层为个旧组马拉格段三层($T_2g_2^3$)白云岩夹灰质白云岩,区内主要发育有 EW 向的礞子庙断裂及 NW 向的小断层,地表未见岩浆岩出露。远景区内 HS-06 异常发育,具有一个明显的浓集中心,异常套合好,异常元素浓度高,异常面积较大,Ag、Pb、Sb、Sn 三级浓度分带明显,As、Bi 和 Cu 异常形态相似。利用钻探查证发现锡铜矿体,赋矿围岩主要为透辉石矽卡岩,有强磁黄铁矿化、碳酸盐化和不同程度的绿泥石化。因此,该区是寻找锡铜多金属矿体的有利地段。

V 号找矿远景区:位于研究区东部,出露地层为个旧组马拉格段二层($T_2g_2^2$)白云岩与含白云质灰岩互层、个旧组马拉格段一层($T_2g_1^1$)厚层状白云岩、个旧组卡房段六层($T_2g_1^6$)石灰岩与灰质白云岩互层,地表未见岩浆岩出露,异常区内构造裂隙较发育。远景区内 HS-07 异常呈条带状展布,具有 3 个明显的浓集中心,异常套合较好,异常元素浓度较大,但异常面积较小。通过野外地质路线调查发现,异常区内构造裂隙多充填网脉状方解石脉,且可见褐铁矿化。该区是寻找锡铜多金属矿体的有利地段,应该做进一步的勘查工作。

6 结论

1) 在构造发育地区应用构造地球化学找矿方法,可以有效缩小找矿范围,为矿产勘查提供有利目标。

2) 通过对老厂矿田东部构造地球化学元素特征的分析,发现研究区内 12 种元素均出现明显不均匀分布,具有不同程度的富集,其中 As、Bi、Cd、Cu、Pb、Sn 离散程度较大,分布范围广,表明这些元素参与了次生富集成晕作用,为老厂东部地区主要成矿元素。运用相关分析对区内的 12 种元素进行了初步分析,显示 Sn、Cu 与 Ag、Sb、Zn、Pb、As、Bi 的相关性较好,且 Pb 与 Zn、Ag 与 Mn、Sb 与 As、Sn 与 Cu 关系密切。

3) 应用 C-A 分形法提取了研究区与 Sn、Cu 密切相关的 8 种元素的异常下限,圈定地球化学综合异常 7 处,对 HS-05、HS-06 进行异常查证,均发现锡铜矿体,说明构造地球化学勘查在该区具有较好的找矿效果。

4) 在综合异常分析和查证的基础上,结合成矿地质条件、构造环境和野外地质调查,划分了 5 处找矿远景区,为下一步找矿工作指明了方向。

参考文献 (References):

- [1] Liao S, Chen S, Deng X, et al. Fluid inclusion characteristics and geological significance of the Xi'ao copper-tin polymetallic deposit in Gejiu, Yunnan Province[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 79(79): 455–467.
- [2] Cheng Y, Mao J, Chang Z, et al. The origin of the world class tin-polymetallic deposits in the Gejiu district, SW China: Constraints from metal zoning characteristics and ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology [J]. Ore Geology Reviews, 2013, 53: 50–62.
- [3] Zhang J, Dai C, Huang Z, et al. Age and petrogenesis of Anisian magnesian alkali basalts and their genetic association with the Kafang stratiform Cu deposit in the Gejiu supergiant tin-polymetallic district, SW China[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 69: 403–416.
- [4] 曹华文,裴秋明,张寿庭,等. 个旧老厂钾质煌斑岩矿物学特征及其锆石 U-Pb 和黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄[J]. 地球化学, 2016, 45(6): 545–568.
- Cao H W, Pei Q M, Zhang S T, et al. Mineralogical characteristics, zircon U-Pb and biotite ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of potassic lamprophyres in the Gejiu tin deposit, Yunnan Province[J]. Geochemica, 2016, 45(6): 545–568.
- [5] 陈守余,赵鹏大,张寿庭,等. 个旧超大型锡铜多金属矿床成矿多样性与深部找矿[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2009, 34(2): 319–324.
- Chen S Y, Zhao P D, Zhang S T, et al. Mineralizing multiformity and deep prospecting of Gejiu super Sn-Cu multi-metal deposit, Yunnan, China[J]. Earth science; Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(2): 319–324.
- [6] 何光辉,周涛发,范裕,等. 庐江沙溪斑岩型铜金矿床绿泥石的地球化学特征及找矿指示[J]. 矿床地质, 2018, 37(6): 1247–1259.
- He G H, Zhou T F, Fan Y, et al. Geochemical characteristics and exploration implications of chlorite in Shaxi porphyry copper gold deposit, Lujiang [J]. Mineral Deposits, 2018, 37(6): 1247–1259.
- [7] 孙岩. 论构造地球化学研究[J]. 地球科学进展, 1993, 8(3): 1–6.
- Sun Y. On the study of structural geochemistry [J]. Advance in Earth Sciences, 1993, 8(3): 1–6.
- [8] Han R S. Main study progress for ten years of Tectono-geochemistry [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology & Geochemistry, 2013(2): 198–203.
- [9] Han R S, Deyun M A, Peng W U, et al. Ore-finding method of fault tectono-geochemistry in the Tongchang Cu-Au polymetallic orefield, Shaanxi, China: I. Dynamics of tectonic ore-forming processes and prognosis of concealed ores[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2009, 28(4): 397–404.
- [10] 钱建平,黄德阳,谢彪武,等. 西藏谢通门县斯弄多铅锌矿区矿床地质特征和构造地球化学找矿研究[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(1): 29–41.
- Qian J P, Huang D Y, Xie B W, et al. Study on geology and tectono-geochemistry of the Silongduo Lead-Zinc deposit in Xietongmen County, Tibet [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(1): 29–41.
- [11] 谢彪武,钱建平,黄德阳,等. 西藏阿里住浪铜银矿区构造地球化学找矿研究[J]. 地质与勘探, 2012, 48(4): 807–814.
- Xie B W, Qian J P, Huang D Y, et al. A study of structural geochemical prospecting in the alexilang copper silver ore area, Tibet [J]. Geology and Exploration, 2012, 48(4): 807–814.
- [12] 金凌. 构造地球化学在某矿区的应用[J]. 物探与化探, 1981, 5(3): 174–177.
- Jin J. Application of structural geochemistry in a mining area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1981, 5(3): 174–177.
- [13] 吕古贤,孙岩,刘德良,等. 构造地球化学的回顾与展望[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(4): 479–494.
- Lyu G X, Sun Y, Liu D L, et al. Review and prospect of tectonic geochemistry [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(4): 479–494.
- [14] 齐家喆,麦广田. 地质构造地球化学特征要素及其在区域化探解释中的应用[J]. 物探与化探, 1993, 17(1): 14–21.
- Qi J Z, Mai G T. Geochemistry characteristic elements of geological structure and their application in regional geochemical exploration interpretation [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1993, 17(1): 14–21.
- [15] 安国英. 青海省东昆仑中段地区构造地球化学特征及地质意义[J]. 物探与化探, 2015, 39(1): 69–75.
- An G Y. Tectonic geochemistry of the central segment of the East Kunlun Mountains in Qinghai Province and its geological significance [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(1): 69–75.
- [16] Han R S, Liu C, Huang Z, et al. Geological features and origin of the Huize carbonate-hosted Zn-Pb-(Ag) District, Yunnan, South China [J]. Ore Geology Reviews, 2007, 31(1): 360–383.
- [17] 韩润生,陈进,高德荣,等. 构造地球化学在隐伏矿定位预测中的应用[J]. 地质与勘探, 2003, 39(6): 25–28.
- Han R S, Chen J, Gao D R, et al. Application of tectonic geochemistry ore-finding method in orientation prognosis of concealed ores [J]. Geology and Exploration, 2003, 39(6): 25–28.
- [18] 郭泽华,王雷,韩润生,等. 滇西云县红豆山铜矿构造地球化学特征及找矿预测[J]. 中国地质, 2019, 46(1): 178–190.
- Guo Z H, Wang L, Han R S, et al. Tectonic geochemical characteristics and ore prediction in Hongdoushan copper deposit, Yunxian area, Western Yunnan [J]. Geology in China, 2019, 46(1): 178–190.
- [19] 韩润生. 隐伏矿定位预测的矿田(床)构造地球化学方法[J]. 地质通报, 2005, 24(10): 104–110.
- Han R S. Orefield/deposit tectonic-geochemistry method for the localization and prognosis of concealed orebodies [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(10): 104–110.
- [20] 邓军,孙忠实,杨立强,等. 吉林夹皮沟金矿带构造地球化学特征分析[J]. 高校地质学报, 2000, 6(3): 405–411.
- Deng J, Sun Z S, Yang L Q, et al. Tectono-Geochemical Analysis of Jiapiyou Gold Belt, Jilin Province [J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6(3): 405–411.
- [21] 韩润生,陈进,李元,等. 云南会泽麒麟厂铅锌矿床构造地球化

- 学及定位预测[J]. 矿物学报, 2001(4): 667-673.
- Han R S, Chen J, Li Y, et al. Tectono-geochemical features and orientation prognosis of concealed ores of Qilinchang Lead-Zinc deposit in Huize, Yunnan[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2001(4): 667-673
- [22] 钱建平, 何胜飞, 王富民, 等. 安徽省廖家地区地质地球化学特征和构造地球化学找矿[J]. 物探与化探, 2008, 32(5): 519-524.
- Qian J P, He S F, Wang F M, et al. Geological and geochemical characteristics and tectono-geochemical prospecting work in Liaojia area, Anhui Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2008, 32(5): 519-524.
- [23] 范柱国, 秦德先, 谈树成, 等. 个旧老厂锡多金属矿田东部断裂构造地球化学异常特征[J]. 矿物学报, 2004, 24(2): 129-135.
- Fan Z G, Qin D X, Tan S C, et al. Geochemical anomaly signatures in the eastern Gejiu laochang tin polymetallic ore field[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2004, 24(2): 129-135.
- [24] 王力, 孟昭君, 毛政利. 构造地球化学方法在个旧锡矿外围找矿预测中的应用[J]. 矿床地质, 2002, 21(S1): 1197-1200.
- Wang L, Meng Z J, Mao Z L, et al. Application of tectogeochemistry in metallogenic prognosis in periphery of Gejiu Tin ore deposit [J]. Mineral Deposits, 2002, 21(S1): 1197-1200.
- [25] 毛景文, 程彦博, 郭春丽, 等. 云南个旧锡矿田: 矿床模型及若干问题讨论[J]. 地质学报, 2008, 82(11): 1455-1467.
- Mao J W, Chen Y B, Guo C L, et al. Gejiu Tin polymetallic ore-field: Deposit model and discussion for several points concerned [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(11): 1455-1467.
- [26] Cheng Y, Mao J, Zhu X, et al. Iron isotope fractionation during supergene weathering process and its application to constrain ore genesis in Gaosong deposit, Gejiu district, SW China[J]. Gondwana Research, 2015, 27(3): 1283-1291.
- [27] Sun S Y. Study on the multi-episodic activity of faults in the Gaosong field of Gejiu tin deposits[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2004.
- [28] 庄永秋, 王任重, 杨书培, 等. 云南个旧锡铜多金属矿床[M]. 北京: 地震出版社, 1996.
- Zhuang Y Q, Wang R Z, Yang S P, et al. Gejiu tin copper polymetallic deposit, Yunnan[M]. Beijing: Earthquake Press, 1996.
- [29] Zhao J, Zuo R, Chen S, et al. Application of the tectono-geochemistry method to mineral prospectivity mapping: a case study of the Gaosong tin-polymetallic deposit, Gejiu district, SW China [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 71: 719-734.
- [30] He F P, Wang Z, Chen F, et al. Identification and assessment of Sn-polymetallic prospects in the Gejiu western district, Yunnan (China) [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 145: 106-113.
- [31] Cheng Y, Mao J. Age and geochemistry of granites in Gejiu area, Yunnan province, SW China: Constraints on their petrogenesis and tectonic setting[J]. Lithos, 2010, 120(3): 258-276.
- [32] 秦德先, 黎应书, 范柱国, 等. 个旧锡矿地球化学及成矿作用演化[J]. 中国工程科学, 2006(1): 30-39.
- Qin D X, Li Y S, Fan Z G, et al. The geochemistry and mineralization evolution of Gejiu Tin ore deposits[J]. Strategic Study of CAE, 2006(1): 30-39.
- [33] 廖时理, 陈守余, 姚涛, 等. 个旧西凹铜—锡多金属矿床地球化学特征及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(3): 635-646.
- Liao S L, Chen S Y, Yao T, et al. Geochemical characteristics and geological significance of the Xi'ao Cu-Sn polymetallic deposit in the Gejiu area [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(3): 635-646.
- [34] 杨宝富, 李彬, 魏超. 个旧老厂矿田东部矿床控矿因素、成矿规律及找矿预测[J]. 矿物学报, 2016, 36(4): 479-487.
- Yang B F, Li B, Wei C, et al. Ore-controlling factors, metallogenetic regularity and prospecting of eastern Laochang deposits, Gejiu mine, Yunnan Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2016, 36(4): 479-487.
- [35] 陈守余, 赵鹏大, 童祥, 等. 个旧东区蚀变花岗岩型锡铜多金属矿床成矿特征及找矿意义[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2011, 36(2): 277-281.
- Chen S Y, Zhao P D, Tong X, et al. Metallogenic characteristics of western low altered Tin-Copper polymetallic deposit and its prospecting significance in east part of Gejiu, Yunnan[J]. Earth science: Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(2): 277-281.
- [36] Caron M E, Grasby S E, Ryan M C. Spring water trace element geochemistry: A tool for resource assessment and reconnaissance mineral exploration[J]. Applied Geochemistry, 2008, 23(12): 3561-3578.
- [37] Zhu W, Sun Y, Guo J, et al. Prospects for study of tectono-geochemistry[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2003, 13(3): 161-165.
- [38] Turekian K K, Wedepohl K H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust[J]. Geological Society of America Bulletin, 1961, 72(2): 175.
- [39] 罗先熔. 勘查地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- Luo X R. Exploration geochemistry [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [40] 袁玉涛. 化探数据处理方法对比研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- Yuan Y T. Comparative study on geochemical data processing methods [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [41] 向中林, 顾雪祥, 王恩营, 等. 新疆博罗科努成矿带东段地球化学分形特征及找矿预测[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2019, 38(4): 49-57.
- Xiang Z L, Gu X X, Wang E Y, et al. Geochemical fractal characteristics and prospecting prediction of the eastern section of the Boluokenu metallogenic belt, Xinjiang[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2019, 38(4): 49-57.
- [42] Cheng Q, Agterberg F P, Ballantyne S B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1994, 51(2): 109-130.
- [43] Zuo R, Xia Q, Zhang D. A comparison study of the C-A and S-A models with singularity analysis to identify geochemical anomalies

in covered areas [J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 33: 165 – 172.

[44] Zuo R, Jian W. Fractal/multifractal modeling of geochemical data: A review[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 164: 33 – 41.

[45] Zhao J, Chen S, Zuo R. Identification and mapping of litho-geochemical signatures using staged factor analysis and fractal/multifractal models[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2017, 17(3): 239 – 251.

[46] 谢淑云, 鲍征宇. 地球化学场的连续多重分形模式[J]. *地球化学*, 2002, 31(2): 191 – 200.

Xie S Y, Bao Z Y. Continuous multifractal model of geochemical field [J]. *Geochimica*, 2002, 31(2): 191 – 200.

[47] 成秋明. 多维分形理论和地球化学元素分布规律[J]. *地球科学*, 2000, 25(3): 311 – 318.

Cheng Q M. Multidimensional fractal theory and distribution law of geochemical elements[J]. *Earth Science*, 2000, 25(3): 311 – 318.

[48] 刘世宝, 陈鑫, 国显正, 等. 分形(多重分形)在区域化探数据处理中的应用——以柴北缘荒漠戈壁景观区为例[J]. *物探与化探*, 2016(3): 550 – 556.

Liu S B, Chen X, Guo X Z, et al. Fractal/multifractal modeling of geochemical exploration data in desert landscape area of Qaidam-Basin [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016(3): 550 – 556.

Large scale tectonic geochemical characteristics and prospecting prediction in eastern Laochang orefield, Gejiu, Yunnan Province

HUANG Da-Zheng¹, CHEN Shou-Yu^{1,2}, ZHAO Jiang-Nan¹, WU Shuai-Ji¹, ZHANG Yu-Ce¹

(1. School of Earth Resources, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the past half a century, with the consumption of resources, the Laochang orefield has entered the rank of resource crisis. In order to alleviate the shortage of mineral resources in the Gejiu tin deposit and prolong the life of the mine, the authors, on the basis of 1 : 10 000 tectonic geochemical survey in the study area, analyzed and summarized the geochemical characteristics of 12 elements, used correlation analysis to determine the correlation of elements, used content-area (C-A) fractal method to determine the anomaly threshold, delineated the abnormal range, and then divided the prospecting area. The results show that the 12 elements are highly dispersed, differentiated and enriched in different degrees, among which Pb, Sn, Cu, Bi, As and Cd are the main ore-forming elements in the eastern part of Laochang, Sn and Cu elements have good correlation with Ag, Sb, Zn, Pb, As and Bi elements, and are closely related to mineralization; five prospecting area were delineated, and tin-copper orebodies were found through engineering verification, which shows that the application of tectonic geochemical method in this area can effectively provide scientific basis for the prospecting work.

Key words: tectonic geochemistry; C-A fractal; prospecting area; crisis mine; Gejiu tin mine

(本文编辑:蒋实)